

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.15

УДК 539.3, 539.4

А.М. Игнатова, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, М.Н. ИгнатовПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДЫ
И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОБОЙНИКА
ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ**

Существуют исследования, описывающие влияние высокоскоростного удара объекта о поверхность металла. Однако эти исследования основаны на экспериментах, проведенных с «чистыми» неметаллическими материалами, такими как оксиды, карбиды и т.д. В реальных условиях неметаллические объекты имеют сложный состав и неоднородную структуру, в частности, они могут быть представлены минералами. Целью настоящей работы является выявление особенностей разрушения металлической преграды и неметаллического пробойника при высокоскоростном взаимодействии для использования результатов в оптимизации конструктивных решений защиты изделий специального назначения. В качестве объекта исследования рассматриваются титановая металлическая преграда и пробойник из горной породы габброидного типа (силикатного типа) сферической формы. Скорость образца пробойника составляла 340 м/с, скорость съемки 25 000 кадр/с, время экспозиции 1/71 000 с. Разрешение полученных снимков изображений составило 512 × 400 пикселей. Удар пробойником осуществляли под углом 90° к поверхности в середину и с краев металлической преграды. Установлено, что в момент удара пробойником в месте соударения возникает интенсивное взаимодействие, сопровождающееся выделением температуры, о чем свидетельствует зафиксированный при съемке сноп искр, после удара по всей протяженности металлической преграды распространяются упругие колебания, неметаллический пробойник фрагментируется. Также неметаллический пробойник при столкновении с металлической преградой испытывает воздействие отраженной ударной волны в виде кинетической энергии преграды и диссипирует (рассеивает) ее. Полученные сведения об особенностях разрушения металлической преграды и неметаллического пробойника при высокоскоростном взаимодействии позволят найти оптимальные конструктивные решения защиты специальных изделий при их эксплуатации.

Ключевые слова: каменное литье, синтетический минеральный сплав, фрагментация, хрупкое разрушение, деформация, удар, трещины, механика разрушения, диссипация, видеофиксация.

A.M. Ignatova, M.Sh. Nikhamkin, L.V. Voronov, M.N. Ignatov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**FEATURES OF DESTRUCTION OF METAL TARGET
AND NON-METAL PUNCHER IN HIGH SPEED CONNECTIVITY**

There are studies that describe the impact of high-speed impact of a micro-object on the surface of the metal. Other studies are based on experiments carried out with "pure" non-metallic materials such as ox-

ides, carbides, etc. In the real exploitation micro-objects have a complex structure and a heterogeneous structure. The aim of this work is to determine the characteristics of the destruction of the metal barriers and non-metal puncher at high-speed punch interaction for the results in the optimization of design solutions protect products for special purposes. As the object of study are considered titanium metal barrier thickness of 2 mm and a punch of rock gabbroid type spherical shape with a diameter of 23 mm. The rate of the sample was 230 punch m/s burst rate to 25,000 in sec, the exposure time to 1/71000. The resolution of the images was 512h400 pixel images. Puncher impact was performed at an angle of 90 to the surface in the middle and at the edges of the metal barriers. It was found that after hitting a punch along the entire length of the metal barriers apply elastic vibrations, which are not taken into account when assessing the effects of previous stroke micro-objects. Non-metallic punch in a collision with a barrier metal is affected by the reflected shock wave in the form of kinetic energy is dissipated and the barriers (scatters) it, as a result of the punch is heated and destroyed by the mechanism of ductile failure, and the other by the mechanism of brittle fracture. Received information about the features of destruction of metal and non-metal barriers at high-speed punch cooperation will allow to find the optimal design solutions the protection of special products in their operation.

Keywords: stone casting, synthetic mineral alloys, fragmentation, fragile destruction, deformation, impact, cracks, mechanics of destruction, dissipation, video fixation.

В процессе эксплуатации транспортных, коммуникационных средств и инженерных сооружений установлено [1, 2], что зачастую причиной аварий являются повреждения от высокоскоростных ударов неметаллическими объектами, которыми могут быть осколки дорожного покрытия, горной породы, неметаллические элементы конструкций, щебень и т.д. Примером ситуации, когда неметаллические объекты могут привести к аварийной поломке, является повреждение лопаток двигателя самолета при взлете и посадке, столкновение объектов с корпусами вагонов скоростных поездов, кроме того, встреча с неметаллическими объектами может оказаться губительной для космических объектов. Существуют исследования, описывающие влияние высокоскоростного удара объекта о поверхность металла [3, 4]. Однако эти исследования основаны на экспериментах, проведенных с «чистыми» неметаллическими материалами, такими как оксиды, карбиды и т.д. В реальных условиях неметаллические объекты имеют сложный состав и неоднородную структуру, что, согласно работам [5–7], значительно влияет на степень повреждения конструкций. Изменение процессов разрушения неметаллического объекта при столкновении с металлической преградой актуально, так как позволяет выявить особенности реакции преграды и неметаллических материалов в условиях динамических нагрузок.

Целью настоящей работы является выявление особенностей разрушения металлической преграды и неметаллического пробойника при высокоскоростном взаимодействии для использования результатов

в оптимизации конструктивных решений защиты изделий специального назначения.

Экспериментальное исследование высокоскоростного взаимодействия сопряжено с рядом проблем, главная из них – достижение необходимых скоростей взаимодействия [8] и видеофиксация результатов такого взаимодействия. Поскольку взаимодействие длится малый промежуток времени, а человеческое зрение не способно уловить этапы происходящего, то такой результат ранее оценивали уже по последствиям взаимодействия. При этом анализу подвергали кратеры и пробоины, фрагменты разрушения и различные параметры возникших трещин [9]. Такие методы оправдали себя и позволили создать математические модели, описывающие процессы деформации, разрушения и эрозии материалов под действием удара твердых частиц. Однако потребность в визуализации процессов по-прежнему остается наиболее достоверным методом для получения данных, характеризующих высокоскоростное взаимодействие.

Одним из методов, который позволяет максимально отследить процесс соударения и получить численные характеристики (параметры), описывающие такой процесс, является метод визуализации с помощью высокочувствительного фото- и видеоборудования. Для проведения эксперимента и его визуализации использовали комплекс оборудования, представленный на рис. 1. В комплекте установки использовали разгонную трубу с внутренним диаметром 25 мм и длиной 3950 мм и устройство закладки пробойника телескопического типа. Разгон образца неметаллического материала осуществляли с помощью пневмооборудования, использовали насос с ресивером высокого давления объемом 5,2 л. Заполнение ресивера сжатым воздухом осуществлялось от компрессора высокого давления.



Рис. 1. Схема установки проведения испытаний

Использовали системы контроля скорости габброидного образца перед соударением, основанные на измерении времени прохождения ударником контрольного участка траектории движения, ограниченного сетью лазерных лучей в начале и в конце его пути.

Система скоростной видеорегистрации процесса соударения состояла из скоростной видеокамеры Photron Fastcam SA5 и осветительного комплекса. Максимальная скорость съемки камер составляет 775 000 кадр/с при разрешении 128×24 пикселей. Камера регистрирует процесс соударения под углом около 45° к трем ортогональным плоскостям. Для получения качественной видеосъемки при малом времени экспозиции система скоростной видеорегистрации была оборудована осветительным комплексом, состоящим из семи источников света мощностью 1000 Вт каждый. Запуск процесса видеорегистрации осуществляли по триггер-сигналу, генерируемому автоматизированной системой проведения эксперимента.

Управление процессом проведения эксперимента осуществляли автоматизированной системой на базе системы PXI с набором специальных модулей сопряжения разработки National Instruments и удаленного персонального компьютера.

В рамках эксперимента использовали пробойник из горной породы габброидного типа сферической формы диаметром 24,8 мм. В качестве преграды использовали лист титанового сплава. Скорость образца пробойника составляла не более 340 м/с, скорость съемки 25 000 кадр/с, время экспозиции $1/71\,000$ с. Разрешение полученных снимков изображений составило 512×400 пикселей. Удар пробойником осуществляли под углом 90° к поверхности в середину и с краев металлической преграды.

Согласно исследованию [10] удар объекта о поверхность металла может приводить к эрозии и пробойника, и преграды. Однако из-за принципиальной разницы в реакции этих материалов на оказываемое воздействие изменения, происходящие с ними при ударе, имеют разные механизмы.

Видеофиксацией удалось зафиксировать момент соударения пробойника и преграды. При фронтальном столкновении (рис. 2, *а*) сначала визуальных признаков выделения теплоты не обнаруживается, однако позже среди фрагментов разрушения идентифицируются светящиеся частицы (рис. 2, *б*). Тогда как угловые удары сразу же сопровождаются обильным выделением светящихся фрагментов при соударении.

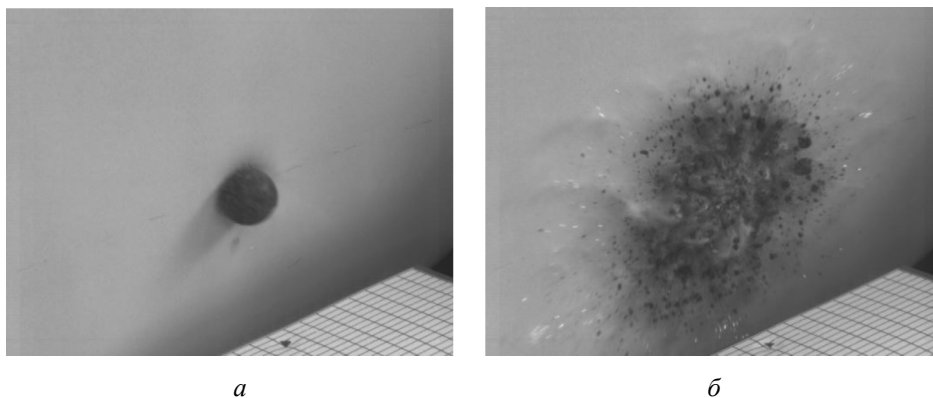


Рис. 2. Фронтальное столкновение неметаллического пробойника с металлической преградой

Кроме того, с помощью видеофиксации удалось зафиксировать, что при высокоскоростном взаимодействии металлическая преграда многократно испытывает упругие колебания по всей длине. Эти колебания не приводят к пластической деформации, а значит, не могут быть зафиксированы после испытания. В приближенных моделях при изучении удара объекта о поверхность металлической преграды наличие таких колебаний не принималось во внимание, так как зафиксировать их не удавалось [14].

Обнаруженные светящиеся частицы разрушения могут быть вызваны двумя причинами. Первая – трение более твердого материала пробойника о металлическую поверхность. Вторая – диссипативные процессы, происходящие в материале пробойника.

Следует отметить, что при ударе неметаллического пробойника о металлическую преграду его деформация и разрушение происходят согласно механизму, характерному для хрупких материалов, т.е. происходит образование трещин, их рост и последующая фрагментация. Ранее закономерности разрушения хрупких материалов были широко рассмотрены для случая, когда неметаллический материал сам являлся преградой для металлического микрообъекта [15]. В результате тех исследований было установлено, что процесс роста трещин и фрагментация зависят от формы пробойника. При столкновении с пробойником со сферической поверхностью характерные трещины Герца распространяются вдоль поверхности преграды, а для пробойника с остроугольной поверхностью они распространялись вглубь неметалличе-

ской преграды. Считаем, что эта закономерность справедлива и для пробойника, но помимо радиальных трещин при разрушении хрупкого материала образуются поперечные, или так называемые кольцевые, трещины, их появление и дальнейшее отделение материала по их границам принято характеризовать как эрозию.

Видеосъемкой зафиксировано образование облака фрагментов разрушения неметаллического пробойника, состоящего из пылевидных частиц и отдельных крупных фрагментов. Причем в зависимости от своего размера фрагменты имеют разную траекторию полета от места соударения. О траектории пылевидных частиц можно судить по распространению общего фронта: он рассредоточивается вдоль поверхности преграды под углом около $8\text{--}12^\circ$. Более крупные фрагменты разрушения размером от 1 мм и больше распространяются также вдоль поверхности, но под углом около $30\text{--}40^\circ$ (рис. 3). Однако траектория фрагментов частично поддается влиянию воздушного потока, сопровождающего пробойник. Разница в размере оказывает некоторое влияние на схему траектории, кроме того, сказывается и различная их удаленность от места удара. Значительная разница в размере в сочетании с различием траекторий указывает на то, что фрагменты разрушения, по-видимому, образуются в результате разных деформационных процессов. Переход от одного механизма деформации к другому возможен при диссипации энергии материалом пробойника [16].

Пробойник обладает кинетической энергией, которая при соударении частично затрачивается на деформацию преграды (упругую и пластическую), колебания которой вновь передаются пробойнику. Остаточная энергия пробойника и колебаний преграды затрачивается на фрагментацию и ускорение фрагментов разрушения. Рассматривая эти процессы, следует учитывать наличие межфазных напряжений в материале пробойника, которые концентрируются на границах аморфных и кристаллических фаз [17]. При фрагментации ударника происходит релаксация его внутренних напряжений; этот фактор, как и колебания преграды, воздействует на характер движения фрагментов разрушения. Совокупность этих факторов приводит к тому, что фрагменты разрушения размером 5–8 мм приобретают в момент разлета среднюю скорость 250 м/с, которая снижается до 50–60 м/с.

Материал неметаллического ударника склонен к диссипации энергии [18]. Диссипативные процессы оказывают влияние на процесс

деформации, поскольку приводят к локальному нагреву материала пробойника в зоне контакта с преградой в момент удара. По материалам исследований выдвинута гипотеза, что количества теплоты и времени ее воздействия при таком взаимодействии пробойника и преграды не достаточно для расплавления, но достаточно для изменения прочностных характеристик материала, поэтому диссипативные процессы приводят к локальному изменению механизма деформации от хрупкого к пластическому [19], т.е. одна часть пробойника разрушается как хрупкий материал, а другая – как пластичный. Наиболее удаленная от места удара поверхность пробойника разрушается как хрупкий материал, а поверхность, непосредственно взаимодействующая с преградой, разрушается по механизмам пластической деформации (рис. 4).

Вероятно, на границе перехода между зонами пластической и хрупкой деформации в пробойнике возникает вторичное отражение волн деформации. Этот процесс, как мы полагаем, влияет на траекторию фрагментов разрушения.

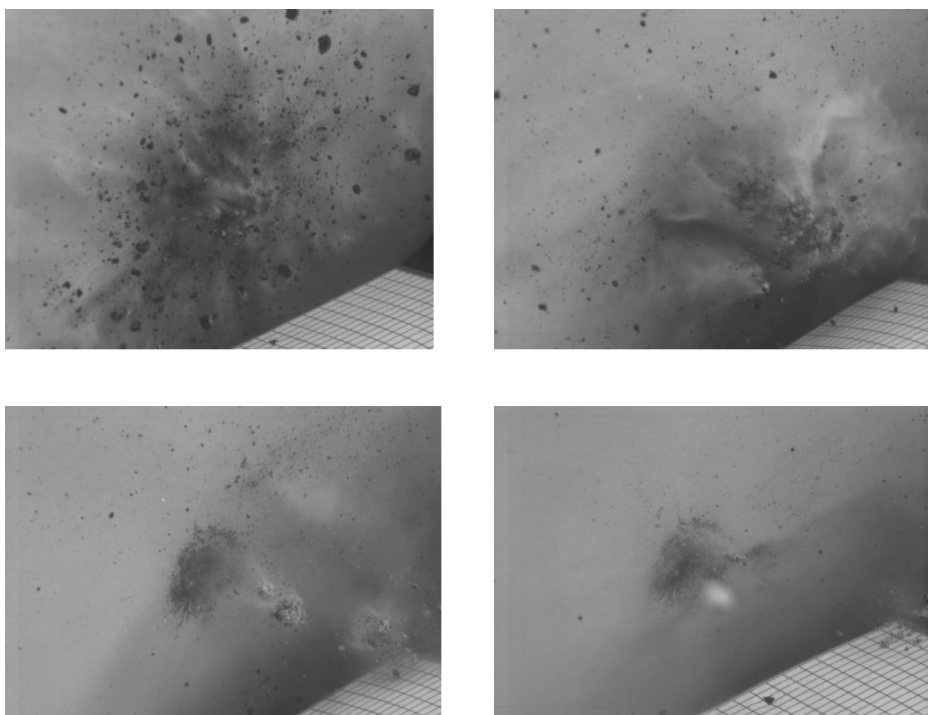


Рис. 3. Разлет фрагментов неметаллического пробойника

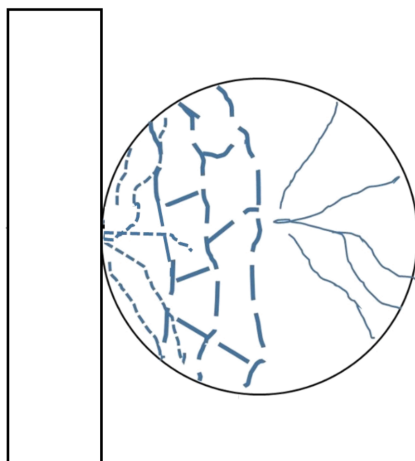


Рис. 4. Схема разрушения неметаллического хрупкого пробойника:
----- – зона эрозии; — · — · — · — зона пластического разрушения;
————— – зона хрупкого разрушения

Таким образом, выявлены особенности разрушения металлической преграды и неметаллического пробойника при высокоскоростном взаимодействии. Установлено, что после удара пробойником по всей протяженности металлической преграды распространяются упругие колебания. Неметаллический пробойник при столкновении с металлической преградой испытывает воздействие отраженной ударной волны в виде кинетической энергии преграды и диссипирует (рассеивает) ее, выдвинута гипотеза, что в результате часть пробойника нагревается и разрушается по механизму пластического разрушения, а другая – по механизму хрупкого разрушения. Полученные сведения об особенностях разрушения металлической преграды и неметаллического пробойника при высокоскоростном взаимодействии позволят найти оптимальные конструкционные решения защиты специальных изделий при их эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК4399.2014.10.

Список литературы

1. Исследование диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов для создания на их основе броневой защиты / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.В. Чудинов, М.Н. Игнатов, М.А. Сокоиков // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 105–112.
2. Исследование взаимосвязи акустической эмиссии и разрушения камнелитых материалов в условиях одноосного сжатия / М.Н. Игнатов, А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.А. Асанов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 126–132.
3. Игнатова А.М., Артемов А.О., Игнатов М.Н. Противокумулятивная защита техники с применением синтетических минеральных сплавов // Двойные технологии. – 2014. – № 2 (67). – С. 13–17.
4. Microhardness and high-velocity impact resistance of SiC and ZrB₂/SiC composites / J. Marschall, D.C. Erlich, H. Manning, W. Duppler, D. Ellerby, M. Gasch // J. Mater. Sci. – 2004. – № 39. – P. 5959–5968.
5. Guiberteau F., Padture N.P., Lawn B.R. Effect of grain size on hertzian contact damage in alumina // J. Am. Ceram. Soc. – 1994. – № 77. – P. 1825–1831.
6. Jacobs M.J.N., Van Dingenen J.L.J. Ballistic protection mechanisms in personal armor // Journal of Materials Science. – 2001. – № 36. – P. 3137–3142.
7. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений / Л.В. Альтшулер, Р.Ф. Трунин, В.Д. Урлин, В.Е. Фортов, А.И. Фунтиков // Успехи физ. наук. – 1999. – Т. 169, № 3. – С. 323–344.
8. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах / Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. – М.: Физматлит, 2008. – 248 с.
9. A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact / Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti, V.A. Cheeseman, B. Powers // International Journal of Impact Engineering. – 2006. – Vol. 32. – P. 1299–1312.
10. Strassburger E., Hunzinger M., Krell A. Fragmentation of ceramics under ballistic impact // Proc. of 25th Int. Symposium on Ballistics, May 17–21. – Beijing, 2010. – P. 1172–1179.
11. Physics of glass failure during rod penetration / D.A. Shockey, D. Bergmannshoff, D.R. Curran, J.W. Simons // Ceram. Eng. Sci. Proc. – 2009. – № 29(6). – P. 23–32.

12. Термомеханическая стойкость защитного материала на основе циркониевых огнеупоров / В.Н. Минеев, А.И. Фунтиков, Ф.А. Акопов [и др.] // Новые огнеупоры. – 2002. – № 2. – С. 42–47.

13. Панченко В.И., Полежаев Ю.В. Основные закономерности кинетики эрозионного разрушения материалов // Инженер.-физ. журнал. – 1987. – Т. 52, № 5. – С. 709–716.

14. Harris F.C. A study of parameters influencing the erosion of reentry material // AIAA Paper. – 1975. – № 75–217.

15. Ральф А.У., Видерхорн С.М. Эрозия при ударе твердых частиц // Эрозия / под ред. К. Прис. – М.: Мир, 1982. – С. 80–139.

16. Dietzel H., Neukum G., Rauser P. Micrometeoroid simulation studies on metal targets // J. Geophys. Res. – 1972. – Vol. 77, № 8. – P. 1375–1395.

17. Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционного материала / Ю.В. Полежаев, В.П. Романченков, И.В. Чирков, В.Н. Щебеко // Инженер.-физ. журнал. – 1979. – Т. 37, № 3. – С. 395–404.

18. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Экспериментальное исследование деформации и соединения микрочастиц с преградой при высокоскоростном ударе // Прикладная механика и техн. физика. – 2000. – Т. 41, № 2. – С. 47–52.

19. Исследование защитных свойств экранов из композита керамика/алюминий при высокоскоростном ударе / В.В. Сильвестров, А.В. Пластинин, В.В. Пай, И.В. Яковлев // Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35, № 3. – С. 126–132.

References

1. Ignatova A.M., Artemov A.O., Chudinov V.V., Ignatov M.N., Sokovikov M.A. Issledovanie dissipativnykh svoystv sinteticheskikh mineral'nykh splavov dlia sozdaniia na ikh osnove bronevoi zashchity [Study of dissipative properties of synthetic mineral alloys to create on their basis of armor protection]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3, pp. 105-112.

2. Ignatov M.N., Ignatova A.M., Artemov A.O., Asanov V.A. Issledovanie vzaimosviasi akusticheskoi emissii i razrusheniia kamnelitykh materialov v usloviiakh odnoosnogo szhatiia [Study of the interrelationship of acoustic emission and destruction carnality materials under uniaxial comp-

ression]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 2, pp. 126-132.

3. Ignatova A.M., Artemov A.O., Ignatov M.N. Protivokumulativnaia zashchita tekhniki s primeneniem sinteticheskikh mineral'nykh splavov [Protivokumulativnymi protection techniques using synthetic mineral alloys]. *Dvoynye tekhnologii*, 2014, no. 2(67), pp. 13-17.

4. Marschall J., Erlich D.C., Manning H., Duppler W., Ellerby D., Gasch M. Microhardness and high-velocity impact resistance of SiC and ZrB₂/SiC composites. *Journal of Materials Science*, 2004, no. 39, pp. 5959-5968.

5. Guiberteau F., Pature N.P., Lawn B.R. Effect of grain size on hertzian contact damage in alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994, no. 77, pp. 1825-1831.

6. Jacobs M.J.N., Van Dingenen J.L.J. Ballistic protection mechanisms in personal armor. *Journal of Materials Science*, 2001, no. 36, pp. 3137-3142.

7. Al'tshuler L.V., Trunin R.F., Urlin V.D., Fortov V.E., Funtikov A.I. Razvitie v Rossii dinamicheskikh metodov issledovaniy vysokikh davlenii [The development of Russia's dynamic methods of high pressure research]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1999, vol. 169, no. 3, pp. 323-344.

8. Kanel' G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. Eksperimental'nye profili udarnykh voln v kondensirovannykh veshchestvakh [Experimental profiles of shock waves in condensed substances]. Moscow: Fizmatlit, 2008. 248 p.

9. Duan Y., Keefe M., Bogetti T.A., Cheeseman B.A., Powers B. A Numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, pp. 1299-1312.

10. Strassburger E., Hunzinger M., Krell A. Fragmentation of ceramics under ballistic impact. *Proc. of 25th Int. Symposium on Ballistics*, May 17–21. Beijing, 2010, pp. 1172-1179.

11. Shockey D.A., Bergmannshoff D., Curran D.R., Simons J.W. Physics of glass failure during rod penetration. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2009, no. 29(6), pp. 23-32.

12. Mineev V.N., Funtikov A.I., Akopov F.A. Termomekhanicheskaya stoikost' zashchitnogo materiala na osnove tsirkonievyykh ogneuporov [Thermomechanical resistance of protective material based on zirconia refractories]. *Novye ogneupory*, 2002, no. 2, pp. 42-47.

13. Panchenko V.I., Polezhaev Iu.V. Osnovnye zakonomernosti kinetiki erozionnogo razrusheniia materialov [The basic laws of kinetics of erosive destruction of materials]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1987, vol. 52, no. 5, pp. 709-716.

14. Harris F.C. A study of parameters influencing the erosion of reentry material. *AIAA Paper*, 1975, no. 75-217.

15. Ral'f A.U., Viderkhorn S.M. Eroziia pri udare tverdykh chastits. Eroziia [Erosion impact solids. Erosion]. Moscow: Mir, 1982, pp. 80-139.

16. Dietzel H., Neukum G., Rauser P. Micrometeoroid simulation studies on metal targets. *Journal of Geophysical Research*, 1972, vol. 77, no. 8, pp. 1375-1395.

17. Polezhaev Iu.V., Romanchenkov V.P., Chirkov I.V., Shchebeko V.N. Raschetnaia model' protsessa erozionnogo razrusheniia kompozitsionnogo materiala [Estimated model of erosive destruction of composite material]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1979, vol. 37, no. 3, pp. 395-404.

18. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F. Eksperimental'noe issledovanie deformatsii i soedineniia mikrochastits s pregradoi pri vysokoskorostnom udare [Experimental study of deformation and connection of microparticles with an obstacle at high speed impact]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika*, 2000, vol. 41, no. 2, pp. 47-52.

19. Sil'vestrov V.V., Plastinin A.V., Pai V.V., Iakovlev I.V. Issledovanie zashchitnykh svoistv ekranov iz kompozita keramika/aliuminii pri vysokoskorostnom udare [The study of protective properties of screens of composite ceramic/aluminum at high velocity impact]. *Fizika goreniia i vzryva*, 1999, vol. 35, no. 3, pp. 126-132.

Получено 20.01.2016

Об авторах

Игнатова Анна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института безопасности труда, производства и человека Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iam pstu@gmail.com.

Нихамкин Михаил Шмерович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационные двигатели» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru.

Воронов Леонид Васильевич (Пермь, Россия) – доцент кафедры «Авиационные двигатели» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru.

Игнатов Михаил Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.com.

About the authors

Anna M. Ignatova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Labor, Human, Manufacturing Safety, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com.

Mikhail Sh. Nikhamkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Aircraft Engine”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: nikhamkin@mail.ru.

Leonid V. Voronov (Perm, Russian Federation) – Associate Professor, Department of “Aircraft Engine”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru.

Mikhail M. Ignatov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com.